



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**SIMULASI METODE PEMBAGIAN DAYA PADA SISTEM
PENYIMPANAN ENERGI *HYBRID*
BATERAI/SUPERKAPASITOR PADA KENDARAAN
LISTRIK**

Deny Andika Prasetya
NRP 07111440000026

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - EE 184801

**SIMULASI METODE PEMBAGIAN DAYA PADA SISTEM
PENYIMPANAN ENERGI *HYBRID*
BATERAI/SUPERKAPASITOR PADA KENDARAAN
LISTRIK**

Deny Andika Prasetya
NRP 07111440000026

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - EE 184801

**SIMULATION OF POWER SHARING METHOD ON
HYBRID ENERGY STORAGE SISTEM
BATTERY/SUPECAPACITOR IN ELECTRIC VEHICLES**

Deny Andika Prasetya
NRP 0711144000026

Advisors
Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019


PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul **“SIMULASI METODE PEMBAGIAN DAYA PADA SISTEM PENYIMPANAN ENERGI HYBRID BATERAI /SUPERKAPASITOR PADA KENDARAAN LISTRIK”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2019



Deny Andika Prasetya

071114400000026

Halaman ini sengaja dikosongkan

**SIMULASI METODE PEMBAGIAN DAYA PADA
SISTEM PENYIMPANAN ENERGI *HYBRID*
BATERAI/SUPERKAPASITOR PADA KENDARAAN
LISTRIK**

TUGAS AKHIR

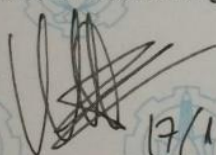
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


17/1/19

Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198208292006042001



Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198006032006041003



Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULASI METODE PEMBAGIAN DAYA PADA SISTEM PENYIMPANAN ENERGI HYBRID BATERAI/SUPERKAPASITOR PADA KENDARAAN LISTRIK

Nama mahasiswa : Deny Andika Prasetya
Dosen Pembimbing I : Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

Abstrak:

Kendaraan listrik merupakan terobosan untuk menjawab permasalahan tentang persediaan energi fosil di bumi yang semakin menipis. Selain menjawab permasalahan energi, kendaraan listrik dapat menjawab permasalahan lingkungan dengan sifatnya yang ramah lingkungan. Media penyimpanan yang paling banyak digunakan pada kendaraan listrik adalah baterai. Baterai memiliki kerapatan energi yang tinggi namun kerapatan daya yang rendah. Pada baterai terdapat beberapa permasalahan diantaranya penurunan usia yang disebabkan oleh arus *charge* dan *discharge* pada *drive cycle* tertentu. Superkapasitor merupakan media penyimpanan energi dengan kerapatan daya yang tinggi namun kerapatan energi yang rendah. Penggunaan baterai dengan superkapasitor dirasa mampu mengatasi permasalahan baterai dalam menghadapi lonjakan arus *charge* dan *discharge*. Pada tugas akhir ini dilakukan simulasi pembagian daya untuk baterai dan superkapasitor pada sistem penyimpanan energi kendaraan listrik. Berdasarkan dari hasil tugas akhir ini dapat disimpulkan bahwa superkapasitor dapat menerima dan memenuhi lonjakan arus ketika dioperasikan dengan baterai. Superkapasitor berperan dalam *power smoothing* baterai yang membuat kualitas daya baterai lebih baik dibandingkan dengan sistem penyimpanan energi yang bekerja hanya menggunakan baterai.

Kata kunci: superkapasitor, baterai, manajemen daya, kendaraan listrik.

Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULATION OF POWER SHARING METHOD ON HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM BATTERY / SUPER CAPACITOR IN ELECTRIC VEHICLES

Student Name : Deny Andika Prasetya
Advisor I : Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.
Advisor II : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

Abstract:

Electric vehicles are an innovation to answer the problem of the depletion of fossil energy on the earth. In addition to answering energy problems, electric vehicles can answer environmental problems with an environmentally friendly nature. The most widely used storage media on electric vehicles is batteries. The battery has a high energy density but low power density. In the battery there are several problems including a decrease in age caused by the charge and discharge currents in a particular drive cycle. Supercapacitors are energy storage media with high power density but low energy density. The use of batteries with supercapacitors is considered capable of overcoming battery problems in the face of surges in charge and discharge currents. In this final project a power sharing simulation for batteries and supercapacitors is carried out on the electric vehicle energy storage system. Based on the results of this final assignment, it can be gathered that supercapacitors can receive and supply current surges when operated with batteries. Supercapacitors play a role in power smoothing of battery that makes the battery power quality better than the energy storage system that works only using batteries.

Key Word: supercapacitor, battery, power management, electric vehicles.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, Pertolongan, Ilmu, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“SIMULASI METODE PEMBAGIAN DAYA PADA SISTEM PENYIMPANAN ENERGI HYBRID BATERAI /SUPERKAPASITOR PADA KENDARAAN LISTRIK”**. Selain disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, tugas akhir ini didedikasikan untuk bangsa Indonesia dalam rangka menyongsong 100 tahun kemerdekaan Republik Indonesia. Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat bermanfaat pada perkembangan teknologi kendaraan listrik yang ramah lingkungan dalam upaya mewujudkan kemandirian energi sebagai bentuk kemerdekaan yang sesungguhnya. Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan didalamnya. Oleh karena itu, penulis berharap kritik dan saran untuk penelitian berikutnya yang lebih baik

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, penulisan banyak mendapat dukungan dalam bentuk apapun dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, seiring dengan selesainya buku tugas akhir ini, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ibu Puji Astutik dan Bapak Untung Prasetyo selaku kedua orang tua yang senantiasa ada untuk memberi semangat, motivasi, dukungan, dan banyak hal lainnya yang sangat berharga dalam hidup saya.
2. Ibu Vita Lystianingrum dan Bapak Heri Suryoatmojo selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, ilmu, bimbingan, serta perhatian selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
3. Tim Superkapasitor Saiful Anshoruddin, Aditya Setiadi, Rusdy Saleh yang berjuang bersama hingga akhirnya tugas akhir ini dapat diselesaikan. Tidak lupa kepada Octavian Nur Fauzi selaku Tim Superkapasitor yang telah lulus terlebih dahulu yang senantiasa memberikan dorongan dan semangat.
4. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.

5. Himatektro SIGAP yang memberikan pelajaran tentang arti dari kesabaran, kegigihan, dan semangat pantang menyerah.
6. Keluarga laboratorium konversi energi listrik angkatan 2014 yang selalu mengisi hari-hari di *quarter* akhir masa perkuliahan dengan ragam cerita disetiap perjumpaannya.
7. Keluarga besar laboratorium konversi energi dulu, kini, dan nanti yang telah memberikan motivasi, dukungan, inspirasi, pengalaman serta kenangan.
8. Keluarga besar penghuni BME E124 & E81 yang selalu memberikan motivasi agar segera dapat menyelesaikan perkuliahan. Dan terkhusus untuk Septyan Arief Isnandar yang membantu penyelesaian *running* program pada PC super di laboratoriumnya.
9. Teman-teman seperjuangan beserta seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

. Penulis mengucapkan terimakasih atas doa dan dukungan yang diberikan selama ini. Penulis juga meminta maaf apabila terdapat kesalahan maupun kekurangan pada tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi mahasiswa teknik elektro ITS pada khususnya dan para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Januari 2019

Deny Andika Prasetya

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan	3
1.7 Relevansi	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Kajian Pustaka	5
2.2 Kendaraan Listrik	5
2.3 Mesin DC	6
2.3.1 Motor DC	6
2.3.2 <i>Regenerative Breaking</i>	8
2.4 Konverter DC-DC[16]	8
2.3.3 Konverter <i>Buck</i>	8
2.3.4 Konverter <i>Boost</i>	13
2.3.5 Konverter Bidirectional.....	16
2.5 Baterai	17
2.6 Super Kapasitor	18
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM.....	21
3.1 Motor.....	21
3.2 Pengatur Kecepatan	23

3.3	Sumber Tenaga	27
3.3.1	Baterai.....	27
3.3.2	Super Kapasitor.....	28
3.4	Manajemen Daya	29
3.4.1	Konverter Bidirectional	30
3.4.2	Strategi Pengaturan	35
3.5	Hasil Perancangan	36
BAB 4	HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS	37
4.1	Pengujian dengan Sumber Tenaga Baterai dan Superkapasitor	39
4.1.1	Pengamatan Terhadap Daya Sumber Tenaga Baterai dan Superkapasitor.	39
4.2	Pengujian dengan Sumber Tenaga Baterai	43
4.2.1	Pengamatan Terhadap Daya Sumber Tenaga Baterai	43
BAB 5	KESIMPULAN	47
5.1	Kesimpulan	47
5.2	Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA	49
LAMPIRAN	51
BIODATA PENULIS	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Sistem kendaraan listrik secara sederhana.....	6
Gambar 2. 2	Rangkaian ekivalen motor DC penguatan terpisah	7
Gambar 2. 3	Rangkaian ekivalen converter <i>buck</i>	9
Gambar 2. 4	(a) Rangkaian ekivalen saat saklar Q konduksi (b) rangkaian ekivalen saat saklar Q padam	9
Gambar 2. 5	Kurva arus induktor.....	10
Gambar 2. 6	Rangkaian ekivalen konverter <i>boost</i>	14
Gambar 2. 7	(a) Rangkaian ekivalen saat saklar Q konduksi (b) rangkaian ekivalen saat saklar Q padam	15
Gambar 2. 8	(a) Rangkaian bidirectional saat mode boost dan (b) rangkaian bidirectional saat mode buck	17
Gambar 2. 9	Karakteristik kerapatan daya dan energi[5]	18
Gambar 3. 1	Blok diagram sistem kendaraan listrik	21
Gambar 3. 2	Kurva karakteristik kecepatan motor - torsi induksi	23
Gambar 3. 3	Rangkaian konverter <i>bidirectional</i> sebagai pengatur kecepatan	24
Gambar 3. 4	Skema pengaturan kecepatan motor DC	25
Gambar 3. 5	Pengujian pengaturan kecepatan motot DC.....	26
Gambar 3. 6	Kurva karakteristik <i>discharge</i> baterai Li-Ion [19]	28
Gambar 3. 7	Kurva karakteristik <i>charge</i> superkapasitor [20].....	29
Gambar 3. 8	Skematik sistem kelistrikan kendaraan listrik.....	30
Gambar 3. 9	Prinsip kerja LPF pada PMS.....	36
Gambar 3. 10	Skema pengaturan konverter <i>bidirectional</i> pada sumber tenaga.....	36
Gambar 4. 1	Pembeban pada motor	37
Gambar 4. 2	Ilustrasi jalan yang dilalui dan kecepatan mobil	39
Gambar 4. 3	Hasil pengujian sistem kendaraan listrik dengan superkapasitor	41
Gambar 4. 4	Tegangan pada DC Bus	42
Gambar 4. 5	Daya sumber referensi	42
Gambar 4. 6	Daya referensi pada baterai dan superkapasitor.....	43
Gambar 4. 7	Hasil pengujian sistem kendaraan listrik tanpa menggunakan superkapasitor.....	45

Gambar 4. 8 *State of Charge* baterai pada konfigurasi
hybrid dan single46

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter Motor DC penguatan terpisah	22
Tabel 3. 2 Data pengujian dengan beban berubah pada tegangan 200 V	22
Tabel 3. 3 Data pengujian dengan beban berubah pada tegangan 240 V	22
Tabel 3. 4 Parameter konverter pada pengatur kecepatan motor DC....	24
Tabel 3. 5 Parameter baterai Li-Ion	27
Tabel 3. 6 Parameter superkapasitor	28
Tabel 3. 7 Parameter konverter baterai pada mode boost.....	30
Tabel 3. 8 Parameter konverter baterai pada mode <i>buck</i>	31
Tabel 3. 9 Parameter konverter superkapasitor pada mode <i>boost</i>	33
Tabel 3. 10 Parameter konverter superkapasitor pada mode <i>buck</i>	34

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini kendaraan listrik mulai diminati karena memiliki kelebihan diantaranya ramah lingkungan dan keuntungan ekonomis lainnya [1]. Tugas akhir mengenai kendaraan listrik pada satu dekade terakhir banyak dilakukan pada sektor peningkatan efisiensi dan performa. Dalam upaya peningkatan efisiensi dan performa kendaraan listrik, salah satu hal penting yang harus dilakukan adalah meningkatkan efisiensi dan performa dari sistem penyimpanan energi listrik yang berhubungan dengan kerapatan daya dan kapasitas energi listrik [1], [2].

Pada sistem penyimpanan energi, baterai merupakan media penyimpanan yang paling sering digunakan [2], [3]. Baterai memiliki kapasitas energi penyimpanan yang cukup besar namun kepadatan dayanya kecil [4]. Hal ini memberikan tantangan untuk tugas akhir tentang baterai kedepannya. Selain kepadatan daya yang kecil, terdapat beberapa kelemahan pada baterai. Diantaranya adalah harga yang cukup mahal, ukuran serta kapasitas baterai, dan usia pakai baterai [5]. Usia pakai baterai dipengaruhi oleh *depth of discharge* (DOD), arus *discharge* yang tinggi, serta suhu operasi yang tinggi [4]. Arus *discharge* merupakan faktor paling berpengaruh terhadap penurunan usia baterai.

Kendaraan listrik yang memiliki karakteristik *drive cycle* tidak konstan akan berpengaruh terhadap arus *discharge* baterai. Hal ini mengakibatkan penurunan usia pakai baterai pada kendaraan listrik semakin cepat karena mengalami proses *charge-discharge* lebih sering keadaan akselerasi dan *regenerative braking* pada *drive cycle* kendaraan listrik [6], [7]. Penurunan usia baterai akibat proses *charge-discharge* disebabkan oleh adanya *irreversible capacity loss* pada baterai, sehingga baterai tidak kembali pada kondisinya semula ketika proses *charging*. *Irreversible capacity loss* akan terakumulasi seiring proses *charge-discharge* pada baterai [7], [8].

Superkapasitor jika dibandingkan dengan baterai memiliki kelebihan dalam kemampuannya menerima dan memberikan lonjakan arus sesaat [9]. Hal ini dikarenakan superkapasitor memiliki kerapatan daya yang besar dan kapasitas penyimpanan energi yang kecil [2]. Dengan karakteristik superkapasitor tersebut, penambahan superkapasitor pada sistem penyimpanan energi kendaraan listrik dapat membantu baterai dalam pemenuhan kebutuhan energi ketika kendaraan

berakselerasi dan menangkap energi ketika kendaraan mengalami *regenerative braking* [9]. Dengan bantuan superkapasitor ini, arus charge-discharge berlebih pada baterai dapat dikurangi sehingga usia pakai baterai dapat dimaksimalkan [4].

1.2 Permasalahan

Perumusan masalah pada tugas akhir tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penggunaan superkapasitor terhadap aliran daya baterai pada sistem kendaraan listrik.
2. Bagaimana perbandingan aliran daya baterai ketika dengan dan tanpa menggunakan superkapasitor pada sistem kendaraan listrik.

1.3 Tujuan

Tugas akhir tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui pengaruh penggunaan superkapasitor terhadap aliran daya baterai pada kendaraan listrik.
2. Membandingkan aliran daya baterai dengan dan tanpa menggunakan superkapasitor pada kendaraan listrik.

1.4 Batasan Masalah

Tugas akhir ini memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Motor penggerak yang digunakan adalah motor *direct current* (DC).
2. Blok sumber tenaga yang digunakan pada simulasi merupakan *generic* dari software MATLAB/Simulink R2015a.
3. Dalam pengaturan pembagian daya tidak mempertimbangkankan kondisi *state of charge* (SOC) dari baterai dan superkapasitor.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pencarian referensi terkait penyimpanan energi, metode pembagian daya, topologi *bidirectional* konverter, *paper*, dan jurnal pendukung

2. Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data dari parameter komponen yang digunakan, seperti spesifikasi motor, spesifikasi baterai, spesifikasi superkapasitor, dan beberapa data penunjang lain.

3. Simulasi Sistem

Pada tahap ini dilakukan desain, perancangan, dan simulasi sistem kendaraan listrik. Simulasi pengujian dilakukan berdasarkan karakteristik pembebanan yang telah ditentukan. Simulasi dilakukan menggunakan *software* MATLAB.

4. Analisis Data dan Hasil Simulasi

Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap hasil dari simulasi pengujian sistem kendaraan listrik. Kemudian akan diberikan kesimpulan dari pembagian daya pada sistem.

5. Penyelesaian Laporan

Pada tahap ini semua rangkaian kegiatan tugas akhir dibukukan dalam bentuk laporan. Tahap ini sekaligus sebagai syarat kelulusan dari mata kuliah tugas akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Pada bab ini dibahas penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode tugas akhir, sistematika pembahasan, dan relevansi terhadap tugas akhir.

Bab 2 : Kajian Pustaka dan Dasar Teori

Pada bab ini dibahas mengenai penelitian sebelumnya dan dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini. Teori yang digunakan diantaranya motor DC, konverter DC-DC, baterai, dan superkapasitor.

Bab 3 : Perancangan Sistem

- Pada bab ini dibahas mengenai desain, perancangan, dan pemodelan antara motor DC, konverter bidirectional DC-DC dan sumber tenaga baterai dan superkapasitor
- Bab 4 : Hasil Pengujian Simulasi dan Analisis
Pada bab ini dibahas mengenai hasil simulasi dan analisis dari performa sistem pembagian daya pada sumber energi *hybrid* kendaraan listrik.
- Bab 5 : Penutup
Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil analisis yang dilakukan dan saran untuk pengembangan penelitian berikutnya.

1.7 Relevansi

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Menjadi referensi yang dapat menunjang industri kelistrikan terutama yang berhubungan dengan kendaraan listrik, energi terbarukan, dan penyimpanan energi
2. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang akan mengerjakan penelitian dengan topik *energy management system*.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab ini berisi mengenai kajian pustaka dan penelitian sebelumnya. Teori-teori yang dibahas meliputi dasar-dasar kendaraan listrik, diantaranya adalah penggerak kendaraan berupa motor DC beserta konstruksinya, konverter *bidirectional*, baterai, dan superkapasitor.

2.1 Kajian Pustaka

Pada sub bab ini dibahas mengenai kajian pustaka dan penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan manajemen energi pada kendaraan listrik. Kajian pustaka dan dasar teori memuat mengenai sistem kendaraan listrik yang meliputi driver motor, metode pembagian daya, karakteristik baterai, dan konverter.

Idris Azizi dan Hammoud dalam *paper*nya [10], [11] meneliti mengenai pengaturan kecepatan motor DC menggunakan konverter *bidirectional* yang mendukung adanya *regenerative breaking*. Mereka melakukan pengaturan terhadap konverter menggunakan pengaturan bertingkat dengan arus dan tegangan. Dalam *paper*nya yang lain, mereka meneliti mengenai metode pembagian daya pada mobil listrik dengan sumber energi *hybrid* antara baterai dengan superkapasitor.

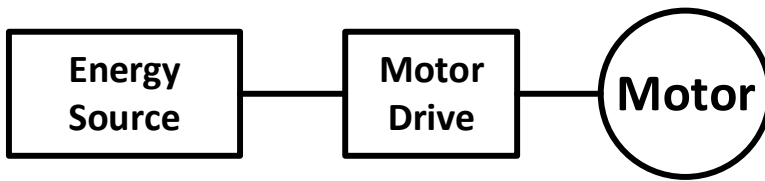
Thowil Afif dan Ayu dalam jurnalnya [12] meneliti mengenai perbedaan baterai *Lithium-Ion*, *Lithium-Polymer*, *Lead Acid*, dan *Nickel-Metal Hydride* pada mobil listrik. Mereka melakukan analisis terhadap kelebihan dan kekurangan setiap jenis baterai dan memberikan beberapa faktor pertimbangan terhadap pemilihan suatu baterai.

Jing dan Lai dalam jurnalnya [13] menjelaskan tentang macam-macam topologi yang digunakan pada sistem penyimpanan energi *hybrid* baterai/superkapasitor. Topologi yang dijelaskan diantaranya topologi pasif, semi aktif, dan aktif.

2.2 Kendaraan Listrik

Sistem kendaraan listrik secara sederhana terdiri dari sumber energi, *driver* motor, dan motor penggerak. Beberapa sumber energi yang umum digunakan adalah baterai, superkapasitor, *fuelcell*, *photovoltaic*, dan *flywheel*. Penggunaan lebih dari satu sumber energi dapat dilakukan

dengan menambah pengaturan manajemen energi pada sistem. *Driver* motor yang digunakan bergantung pada jenis motor yang dipilih, dapat berupa motor arus bolak-balik atau *alternating current* (AC) atau motor DC. Terdapat beberapa metode pengaturan driver motor yang penggunaannya didasarkan pada kebutuhan pengguna. Jenis mesin penggerak pada sistem kendaraan listrik ditentukan sesuai dengan kebutuhan, dapat berupa motor AC atau motor DC [10].



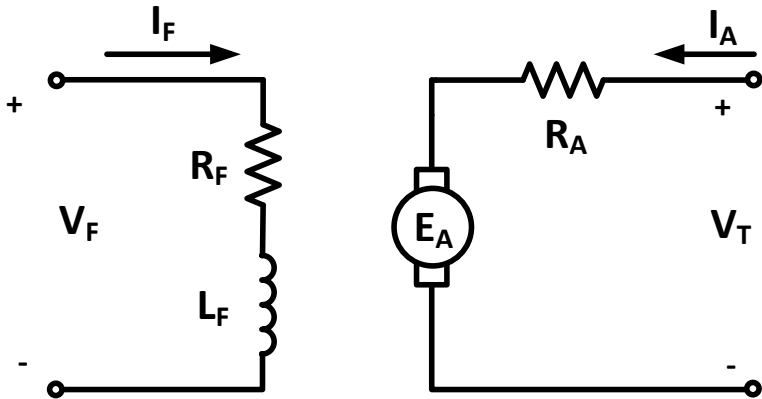
Gambar 2. 1 Sistem kendaraan listrik secara sederhana

2.3 Mesin DC

Mesin DC merupakan sebuah peralatan mekanik-elektronik yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dan sebaliknya. Generator DC merupakan mesin DC yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, sedangkan motor DC merupakan mesin DC yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik [14].

2.3.1 Motor DC

Motor DC merupakan salah satu jenis dari mesin DC yang berfungsi untuk mengubah energi listrik DC menjadi energi mekanik. Motor DC memiliki dua komponen utama yaitu rotor dan stator. Pada bagian stator terdapat kumparan medan dan pada bagian rotor terdapat kumparan jangkar.



Gambar 2. 2 Rangkaian ekivalen motor DC penguatan terpisah

Gambar 2.2 merupakan rangkaian motor DC dengan penguatan terpisah. Berdasarkan persamaan tersebut, tegangan masukan motor dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_T = E_A + I_A R_A \quad (1)$$

$$E_A = k\phi\omega \quad (2)$$

Dengan:

- V_T = Tegangan masukan motor
- E_A = Tegangan dalam terbangkit
- R_A = Beban resistif jangkar
- k = Konstanta mesin
- ϕ = Fluks
- ω = Kecepatan rotor

Motor DC yang dihubungkan dengan beban memiliki persamaan sebagai berikut [11]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L - B_m \omega - T_f \quad (3)$$

Dengan:

- J = Momen inersia

T_e	=	Torsi elektrik
T_L	=	Torsi beban
B_m	=	<i>Viscous friction coefficient</i>
T_f	=	<i>Coulomb friction torque</i>

Mode operasi dari motor DC ditentukan berdasarkan nilai torsi beban yang diberikan. Apabila positif maka akan beroperasi sebagai motor, dan apabila negatif maka akan beroperasi sebagai generator.

2.3.2 *Regenerative Breaking*

Energi mekanik yang ada ketika kendaraan listrik mengalami pengereman dapat diubah menjadi energi listrik. Energi kinetik sisa pengereman tersebut dimanfaatkan untuk memutar *shaft* rotor motor DC. Pada saat bersamaan masukan daya ke motor diputus dan motor berubah menjadi generator. Proses pembangkitan daya listrik ini disebut *regenerative breaking*. Pada kendaraan listrik, daya *regenerative breaking* digunakan untuk pengisian daya pada sumber tenaga [15].

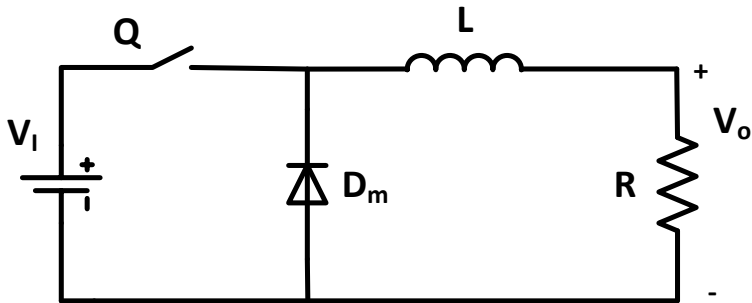
2.4 Konverter DC-DC[16]

Konverter DC-DC merupakan peralatan elektronik yang dapat menaikkan dan menurunkan tegangan atau arus dari sumber DC. Penggunaan konverter ini dapat dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, seperti peralatan elektronik rumah tangga, gawai dan aksesoris pendukungnya, hingga pada kelistrikan kendaraan konvensional. Pada sektor industri konverter umumnya digunakan sebagai pengatur kecepatan motor DC.

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai analisa terhadap rangkaian konverter DC-DC *buck*, *boost*, dan *bidirectional*. Analisa dilakukan dalam kondisi *Continuous Current Mode* (CCM), yaitu kondisi dimana arus induktor mengalir terus menerus tanpa menyentuh nilai nol sekalipun dalam kurun waktu yang singkat.

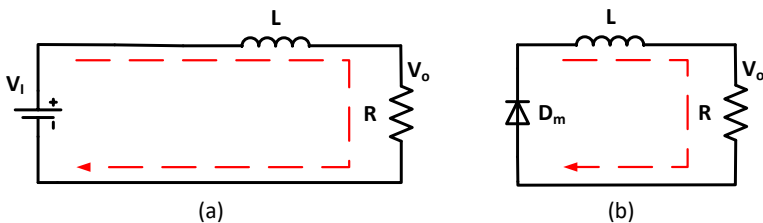
2.3.3 *Konverter Buck*

Konverter *buck* merupakan jenis konverter DC-DC yang nilai rata-rata tegangan *output* V_o lebih rendah dari rata-rata tegangan input V_i . Gambar 2.3 menunjukkan rangkaian ekuivalen konverter *buck* dengan menggunakan saklar semikonduktor.



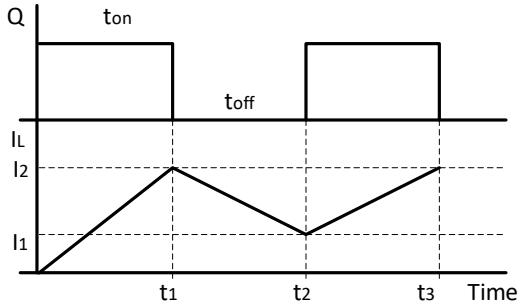
Gambar 2. 3 Rangkaian ekivalen converter *buck*

Prinsip kerja konverter *buck* dijelaskan dalam dua mode, mode pertama yaitu saat saklar konduksi dan mode kedua yaitu saat saklar padam. Mode pertama disebut juga periode pengisian induktor karena arus dari sumber V_i mengalir melalui induktor L menuju ke beban R . Arus pada induktor akan berangsur-angsur naik hingga nilai maksimal. Mode kedua disebut juga periode pengosongan induktor. Pada mode ini saklar padam dan dioda D_m konduksi. Arus mengalir dari induktor menuju beban lalu dioda sebelum kembali ke induktor. Nilai arus induktor berangsur-angsur turun hingga saklar dinyalakan kembali atau rangkain kembali pada mode pertama. Rangkaian ekivalen kedua mode ini dan kurva arus induktor I_L ditunjukkan oleh gambar 2.4.



Gambar 2. 4 (a) Rangkaian ekivalen saat saklar Q konduksi
(b) rangkaian ekivalen saat saklar Q padam

Induktor memiliki sifat induktif murni sehingga arus induktor membentuk kurva linier. Karena konverter dalam kondisi CCM maka arus induktor pada keadaan tunak tidak pernah bernilai nol seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5



Gambar 2. 5 Kurva arus induktor

Analisis rangkaian konverter buck dijelaskan sebagai berikut:

Kondisi saklar Q konduksi

$$di = \Delta I = I_1 - I_0 \quad (4)$$

$$dt = t_{on} = t_1 - t_0 \quad (5)$$

Kondisi saklar Q padam

$$di = -\Delta I = -(I_2 - I_1) \quad (6)$$

$$dt = t_{off} = t_2 - t_1 \quad (7)$$

Rasio antara interval waktu menyala saklar dan periode sistem dalam pola pensaklaran Q disebut dengan *duty cycle* (k).

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (8)$$

$$k = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (9)$$

$$t_{on} = kT \quad (10)$$

$$\begin{aligned} t_{off} &= \frac{t_{on}}{k} - t_{on} \\ t_{off} &= \frac{t_{on} - t_{on}k}{k} \\ t_{off} &= \frac{T(t_{on} - t_{on}k)}{t_{on}} \\ t_{off} &= (1 - k)T \end{aligned} \quad (11)$$

Dengan:

T = Periode sistem

Berdasarkan pada *Kirchoff Voltage Law* (KVL), saat mode saklar Q konduksi maka tegangan sumber sama dengan jumlah seluruh tegangan beban dan dituliskan sebagai berikut:

$$V_i = V_L + V_R \quad (12)$$

Adanya arus yang mengalir pada induktor L menyebabkan timbulnya tegangan pada induktor V_L dan didefinisikan sebagai berikut:

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (13)$$

Dalam kondisi saklar Q konduksi dan dengan melakukan substitusi persamaan (13) dan persamaan (4) dengan persamaan (12), sehingga:

$$V_i = L \frac{\Delta I}{t_{on}} + V_R \quad (14)$$

Sedangkan saat mode saklar Q padam, dioda D_m akan konduksi karena induktor L berubah menjadi sumber tegangan. Berdasarkan KVL persamaan tersebut menjadi:

$$V_L = V_R \quad (15)$$

Berdasarkan persamaan (13) dan kondisi saklar Q yang padam, maka dapat ditulis:

$$L \frac{\Delta I}{t_{off}} = V_R \quad (16)$$

Persamaan pada mode saklar Q konduksi dan persamaan pada mode saklar Q padam disubstitusikan sehingga menghasilkan nilai *duty cycle* sebagai berikut:

Mode Q konduksi

$$V_i = L \frac{\Delta I}{t_{on}} + V_R$$

Mode Q padam

$$\begin{aligned} L \frac{\Delta I}{t_{off}} &= V_R \\ L \Delta I &= V_R t_{off} \end{aligned} \quad (17)$$

Hasil substitusi kedua persamaan

$$\begin{aligned} V_i &= V_R \frac{t_{off}}{t_{on}} + V_R \\ V_i &= V_R \left(1 + \frac{t_{off}}{t_{on}}\right) \\ V_R &= V_i \left(\frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}\right) \\ V_R &= V_i \frac{t_{on}}{T} \\ V_R &= k V_i \end{aligned} \quad (18)$$

Berdasarkan persamaan (18) dapat diketahui bahwa nilai tegangan rata-rata keluaran dari konverter *buck* merupakan hasil kali nilai tegangan rata-rata sumber dengan *duty cycle*. Rentang nilai *duty cycle* diantara 0 - 100%. *Duty cycle* bernilai 0 jika saklar Q padam dan bernilai 100% ketika saklar Q terus menerus konduksi.

Guna mendapatkan kualitas tegangan luaran yang baik, maka dipasang kapasitor paralel dengan beban. Sedangkan untuk mendapat kualitas arus luaran yang baik, induktor L berperan penting sehingga

penentuan nilai induktansi harus tepat sesuai dengan perancangan konverter.

Perhitungan nilai induktor dapat dilakukan pada kondisi saklar Q konduksi atau padam. Dalam analisi ini perhitungan nilai induktor dilakukan saat kondisi saklar konduksi dengan nilai riak arus yang sudah ditentukan sebesar ΔI .

$$\begin{aligned} V_i &= L \frac{\Delta I}{t_{on}} + V_R \\ L &= \frac{(V_i - V_R)t_{on}}{\Delta I} \end{aligned} \quad (19)$$

Dengan $t_{on} = kT = k/f$ dan melakukan substitusi persamaan (18) maka diperoleh persamaan nilai induktor sebagai berikut:

$$\begin{aligned} L &= \frac{(V_i - V_R)t_{on}}{\Delta I} \\ L &= \frac{(V_i - kV_i)k}{\Delta I f} \\ L &= \frac{V_i(1 - k)k}{\Delta I f} \end{aligned} \quad (20)$$

Dengan:

$$f = \text{Frekuensi sistem}$$

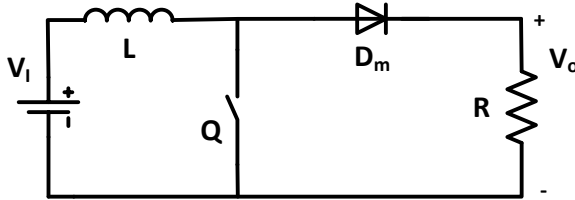
Sedangkan perhitungan nilai kapasitor dapat dilakukan pada saat saklar Q padam dan dengan riak tegangan ΔV yang telah ditentukan maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$C = \frac{(V_o + \Delta V)(1 - k)}{f \cdot R \cdot \Delta V} \quad (21)$$

2.3.4 Konverter Boost

Konverter *boost* merupakan jenis konverter DC-DC yang nilai rata-rata tegangan *output* V_o lebih tinggi dari rata-rata tegangan input V_i .

Gambar 2.6 menunjukkan rangkaian ekivalen konverter *boost* dengan menggunakan saklar semikonduktor.



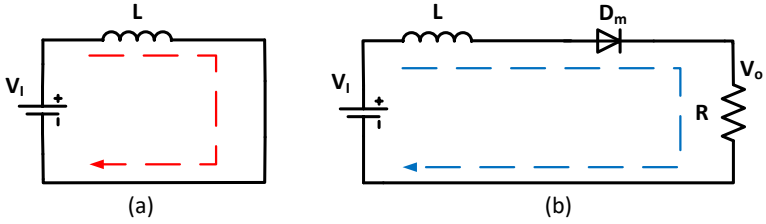
Gambar 2. 6 Rangkaian ekivalen konverter *boost*

Prinsip kerja konverter *boost* dijelaskan dalam dua mode, mode pertama yaitu saat saklar konduksi dan mode kedua yaitu saat saklar padam. Mode pertama disebut juga periode pengisian induktor. Pada mode pertama, induktor dihubungkan-singkat dengan tegangan sumber akibat saklar Q yang konduksi. Semua arus dari tegangan sumber akan mengalir melalui induktor sehingga arus pada beban R dapat diabaikan. Selama periode pengisian induktor, tegangan beban V_R yang merupakan tegangan luaran konverter bernilai nol. Sehingga persamaan tegangan rangkaian dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_i = L \frac{dI}{dt} \quad (22)$$

Saklar Q konduksi selama t_{on} sehingga dt pada persamaan (22) diganti dengan t_{on} dan dI diganti dengan ΔI .

$$\begin{aligned} V_i &= L \frac{\Delta I}{t_{on}} \\ L\Delta I &= V_i t_{on} \end{aligned} \quad (23)$$



Gambar 2. 7 (a) Rangkaian ekivalen saat saklar Q konduksi
(b) rangkaian ekivalen saat saklar Q padam

Pada gambar 2.7 ditunjukkan arah arus saat saklar Q konduksi berupa garis putus-putus berwarna merah dan arah arus saat saklar Q padam berupa garis putus-putus berwarna biru.

Pada mode kedua, saklar Q padam dan mengakibatkan tegangan sumber terangkai seri dengan induktor dan beban. Induktor berada pada periode pengosongan arus dan berubah menjadi sumber tegangan. Hal ini menjadikan beban dipasok oleh dua tegangan sekaligus. Saklar Q padam selama t_{off} sehingga persamaan tegangan rangkaian dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_i + L \frac{\Delta I}{t_{off}} = V_R \quad (24)$$

Persamaan (23) disubstitusikan dengan persamaan (24) sehingga ditulis:

$$\begin{aligned} V_i + V_i \frac{t_{on}}{t_{off}} &= V_R \\ V_R &= V_i \left(1 + \frac{t_{on}}{t_{off}} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

Berdasarkan persamaan (8) dan (11), maka persamaan (25) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_R &= V_i \left(\frac{t_{off}}{T} + \frac{t_{on}}{t_{off}} \right) \\ V_R &= V_i \frac{1}{(1 - k)T} \end{aligned}$$

$$V_R = V_i \frac{1}{(1 - k)} \quad (26)$$

Dari persamaan (26) diketahui bahwa nilai rata-rata tegangan luaran merupakan fungsi dari nilai rata-rata tegangan sumber dan *duty cycle*. Untuk menghasilkan kualitas arus dan tegangan yang baik, maka penentuan nilai induktor dan kapasitor menjadi hal yang sangat penting.

Perhitungan nilai induktor dapat dilakukan dengan analisis saat saklar Q konduksi dengan persamaan sebagai berikut:

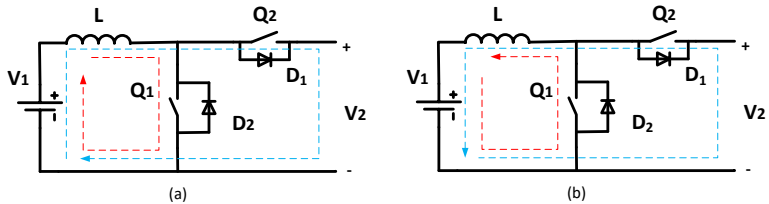
$$\begin{aligned} V_i &= L \frac{\Delta I}{t_{on}} \\ L &= V_i \frac{t_{on}}{\Delta I} \\ L &= V_i \frac{kT}{\Delta I} \\ L &= V_i \frac{k}{\Delta I f} \end{aligned} \quad (27)$$

Dari persamaan (27) dapat ditentukan nilai induktor secara langsung setelah ditentukan terlebih dahulu nilai riak arus ΔI yang diizinkan. Sedangkan nilai kapasitor dapat diperoleh menggunakan cara yang sama dengan konverter *buck* pada saat saklar padam

2.3.5 Konverter Bidirectional

Konverter *bidirectional* merupakan jenis konverter yang dapat digunakan untuk dua arah aliran daya. Pada umumnya konverter jenis ini digunakan pada media penyimpanan energi karena dengan satu perangkat dapat digunakan untuk *charging* dan *discharging*.

Prinsip kerja dari konverter *bidirectional* secara keseluruhan sama dengan konverter *buck* dan *boost*. Yang membedakan adalah topologi rangkaian dan arah arus pada rangkaian. Gambar 2.8 merupakan contoh topologi konverter *bidirectional* dengan mode *boost* dan *buck*.



Gambar 2. 8 (a) Rangkaian bidirectional saat mode boost dan
(b) rangkaian bidirectional saat mode buck

Pada saat saklar Q_1 konduksi dan D_1 aktif induktor berada pada periode pengisian. Pada saat Q_2 konduksi dan D_2 aktif, induktor berada pada periode pengosongan sehingga konverter dalam mode *boost* dengan arah aliran daya dari V_1 menuju ke V_2 . Sebaliknya ketika aliran daya dari V_2 menuju ke V_1 , pada saat Q_2 konduksi dan D_2 aktif induktor berada pada periode pengisian. Pada saat Q_1 konduksi dan D_1 aktif, induktor berada pada periode pengosongan sehingga konverter dalam mode *buck*. Agar konverter dapat bekerja sebagaimana yang diinginkan, digunakan suatu sistem pengaturan yang mengatur agar saklar Q_1 dan Q_2 tidak pernah konduksi secara bersamaan.

2.5 Baterai

Baterai adalah perangkat penyimpanan energi yang paling banyak digunakan pada saat ini. Hal ini dikarenakan baterai dapat digunakan pada sistem dengan daya kecil hingga tinggi. Prinsip kerja baterai yaitu dengan mengubah energi kimia yang tersimpan di dalamnya menjadi energi listrik dengan cara reaksi elektrokimia. Elemen penyimpanan elektrokimia berupa sel. Baterai terdiri dari satu atau lebih sel dihubungkan secara seri, paralel atau keduanya, berdasarkan voltase nominal dan kapasitas baterai yang diinginkan [7].

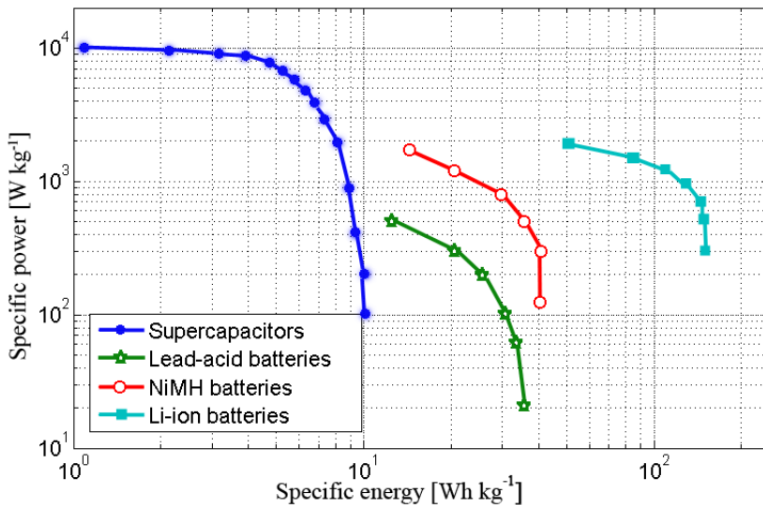
Dalam kehidupan sehari-hari, Baterai merupakan media penyimpanan energi yang paling sering ditemui. Dengan kebutuhan baterai yang sangat besar, inovasi teknologi batrei menjadi suatu topik penelitian yang terus dikembangkan. Teknologi yang hadir membuat baterai semakin handal dan dapat beradaptasi dengan kebutuhan saat ini. Terdapat beberapa jenis teknologi baterai, diantaranya Lead-Acid, NiCd,

NiMH, atau Li-Ion. Pada penelitian ini baterai Li-Ion dipilih karena memiliki efisiensi yang tinggi jika dibandingkan dengan jenis teknologi baterai yang lain [12].

2.6 Superkapasitor

Superkapasitor merupakan media penyimpanan energi yang menyimpan daya listrik secara langsung dalam bentuk daya elektrostatis tanpa melakukan konversi energi. Oleh karena itu superkapasitor mampu menerima dan memberikan energi secara cepat. Superkapasitor memiliki kerapatan daya yang tinggi, namun kerapatan energi yang kecil. Meski kapadatan energinya kecil, superkapasitor mampu menyediakan arus dan daya yang tinggi dengan siklus *charge-discharge* hingga 1 juta kali [17], [18].

Gambar 2.9 merupakan perbandingan beberapa media penyimpanan energy dengan karakteristiknya masing-masing. Dapat diketahui bahwa super kapasitor memiliki kerapatan daya yang tinggi. Sedangkan baterai Li-ion memiliki repatan enrgi yang tinggi.



Gambar 2. 9 Karakteristik kerapatan daya dan energi[5]

Dengan karakteristik yang dimiliki superkapasitor, penggunaan bersama antara superkapasitor dengan baterai akan memberikan beberapa keuntungan diantaranya:

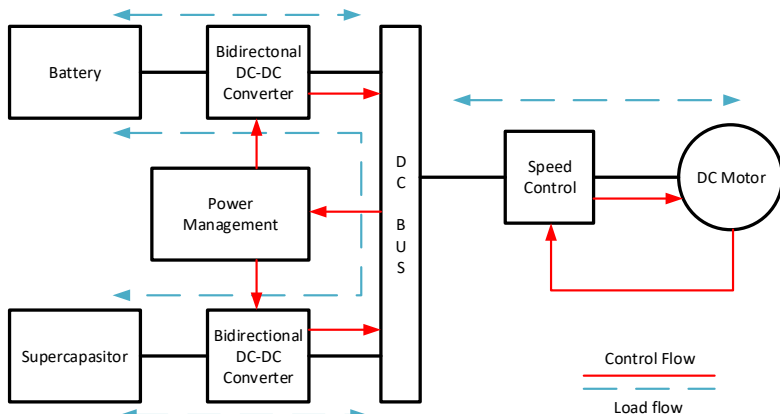
- Meningkatkan akselerasi kendaraan listrik
- Meningkatkan efisiensi kendaraan
- Mengurangi biaya usia pakai baterai dengan memperpanjang usia pakai baterai
- Mengurangi biaya modal dengan pengurangan komponen baterai [4].

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

PERANCANGAN SISTEM

Pada tugas akhir ini, simulasi metode pembagian daya pada kendaraan listrik menggunakan program SIMULINK yang ada dalam *software* MATLAB 2015a. Komponen-komponen yang digunakan pada kendaraan listrik secara keseluruhan meliputi sumber tenaga, konverter *bidirectional* DC-DC, manajemen daya, *driver* motor, dan motor DC dengan penguatan terpisah. Sumber tenaga yang digunakan terdiri dari baterai dan superkapasitor. Dengan adanya dua macam sumber tenaga, maka diperlukan suatu sistem manajemen energi yang didukung dengan konverter *bidirectional* DC-DC guna mengatur aliran daya pada kendaraan listrik. *Driver* motor digunakan untuk mengatur kecepatan motor dan mendukung adanya *regenerative braking*. Pemodelan sistem kendaraan listrik ditunjukkan oleh blok diagram pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Blok diagram sistem kendaraan listrik

3.1 Motor

Motor penggerak sistem kendaraan listrik yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah motor DC dengan penguatan terpisah. Motor DC dipilih karena memiliki kelebihan dalam kemudahan pengaturan kecepatan[11]. Parameter motor DC yang digunakan dalam tugas akhir terdapat pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Parameter Motor DC penguatan terpisah

Parameter	Nilai
Daya nominal (P)	5 HP
Torsi nominal (T_L)	20 Nm
Kecepatan nominal (ω)	183.3 Rad/s
Resistansi jangkar (R_a)	0.5 Ω
Induktansi jangkar (L_a)	0.016 H
Resistansi medan (R_f)	180 Ω
Induktansi medan (L_f)	112.5 H
Kumparan jangkar-medan <i>mutual inductance</i> (L_{af})	1.234 H
Momen inersia (J)	0.05 kg.m ²
<i>Viscous friction coefficient</i> (B_m)	0.02 N.m.s
<i>Coulomb friction torque</i> (T_f)	0 Nm
Tegangan medan (V_f)	150 Volt

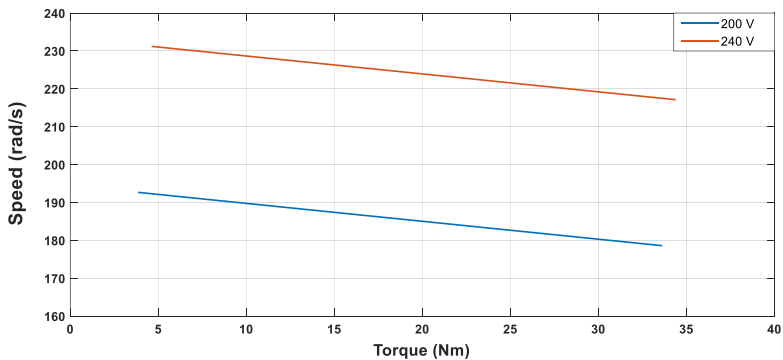
Dilakukan pengujian terhadap motor DC penguatan terpisah untuk mengetahui karakteristik kecepatan-torsi. Pengujian dilakukan dengan memberi variasi nilai pada torsi beban. Hasil pengujian berupa kurva karakteristik kecepatan-torsi motor DC penguatan terpisah yang ditunjukkan pada gambar 3.2.

Tabel 3. 2 Data pengujian dengan beban berubah pada tegangan 200 V

Beban (Nm)	Torsi induksi (Nm)	Kecepatan (rad/s)
0	3.853	192.667
5	8.807	190.325
10	13.76	187.983
20	23.666	183.299
30	33.572	178.615

Tabel 3. 3 Data pengujian dengan beban berubah pada tegangan 240 V

Beban (Nm)	Torsi induksi (Nm)	Kecepatan (rad/s)
0	4.624	231.201
5	9.577	228.859
10	14.53	226.517
20	24.436	221.833
30	34.343	217.149



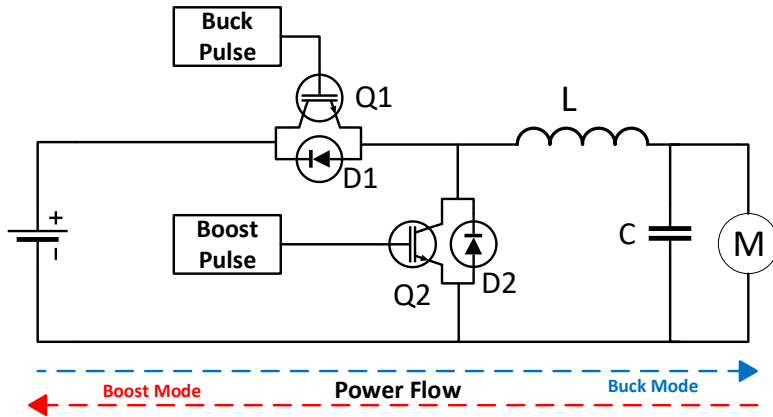
Gambar 3. 2 Kurva karakteristik kecepatan motor - torsi induksi

Dari kurva kecepatan-torsi, diketahui bahwa seiring bertambahnya beban maka membuat torsi induksi meningkat dan kecepatan motor menurun. Diketahui pula perbedaan nilai tegangan sumber menyebabkan perbedaan kecepatan pada motor DC

3.2 Pengatur Kecepatan

Salah satu metode pengaturan kecepatan motor DC adalah melakukan perubahan nilai tegangan sumber. Pada tugas akhir ini, pengatur kecepatan motor DC dirancang menggunakan konverter *bidirectional* dengan pertimbangan agar konverter dapat mengalirkan daya dan menjaga tegangan DC *Bus* ketika terjadi *regenerative breaking*. Gambar 3.3 merupakan rangkaian dari konverter *bidirectional* yang digunakan sebagai pengatur kecepatan.

Pada gambar 3.3 sumber tegangan berasal dari DC *Bus*. Luaran konverter pada masing-masing mode diatur oleh *duty cycle*. Topologi ini memiliki mode *buck* ketika motor bekerja dan mode *boost* ketika terjadi *regenerative breaking*. Saat mode *buck*, Q_1 dan D_2 aktif. Sedangkan saat mode *boost* Q_2 dan D_1 aktif.



Gambar 3. 3 Rangkaian konverter *bidirectional* sebagai pengatur kecepatan

Perhitungan nilai komponen konverter tersebut dilakukan melalui analisis mode *buck* karena perannya sebagai pengatur kecepatan motor.

Tabel 3. 4 Parameter konverter pada pengatur kecepatan motor DC

Parameter	Nilai
Tegangan sumber (V_i)	400 Volt
Tegangan luaran (V_o)	200 Volt
Frekuensi switching (f)	5 kHz
Riak arus (ΔI)	1.5 Ampere
Riak tegangan (ΔV)	5%

Perhitungan duty cycle dan nilai induktor berdasarkan pada persamaan (18) dan (20) dituliskan sebagai berikut:

$$k = \frac{V_o}{V_i}$$

$$k = \frac{200}{400}$$

$$k = 0.5$$

$$L = \frac{V_i(1-k)k}{\Delta I f}$$

$$L = \frac{400(1-0.5)0.5}{1.5 \cdot 5000}$$

$$L = 13.333 \text{ mH}$$

Perhitungan menghasilkan nilai induktor sebesar 13.333 mH.

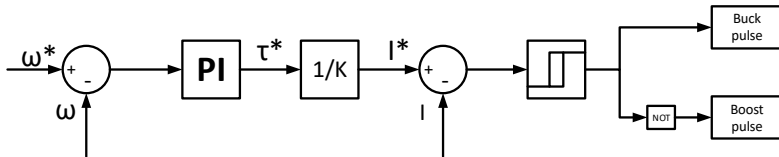
Pada perhitungan nilai kapasitor, Motor dimodelkan menjadi beban statis R_{motor} dengan nilai 8.689Ω yang diperoleh dari perhitungan tegangan nominal masukan motor dan daya nominal masukan motor. Perhitungan nilai kapasitor berdasarkan pada persamaan (21) dituliskan sebagai berikut:

$$C = \frac{(V_o + \Delta V)(1-k)}{f \cdot \Delta V \cdot R_{bat}}$$

$$C = \frac{(400 + 10)(1-0.5)}{5000 \cdot 10 \cdot 8.689}$$

$$C = 242 \mu F$$

Perhitungan menghasilkan nilai kapasitor sebesar 242 μF .



Gambar 3. 4 Skema pengaturan kecepatan motor DC

Pada tugas akhir ini, konverter diatur dengan dua konfigurasi pengaturan bertingkat. Konfigurasi pertama merupakan pengaturan kecepatan konstan. Kecepatan diatur dengan membandingkan nilai kecepatan referensi dengan kecepatan aktual motor. *Error* perbandingan diolah dengan *Proportional-Integral-Derivative* (PID) *controller* yang hasilnya diperlukan untuk sinyal referensi konfigurasi kedua. Konfigurasi kedua merupakan pengaturan arus dengan metode *hysteresis current control* dengan membandingkan arus referensi dengan arus aktual induktor untuk menghasilkan sinyal *Pulse Wave Modulation* (PWM)

saklar Q_1 dan Q_2 . Gambar 3.4 merupakan skema pengaturan kecepatan motor DC

PID *controller* pada skema pengaturan kecepatan ini memiliki nilai K_p , K_i , dan K_d sebesar 2.43, 50, dan 0.01. Nilai tersebut diperoleh dengan metode *trial and error*. K merupakan konstanta untuk merubah torsi referensi dari luaran PID menjadi arus referensi. Nilai K diperoleh dari perhitunga sebagai berikut:

$$T_e = B_m \omega + J \frac{d\omega}{dt} + T_L + T_f$$

$$T_e = 0.02 \cdot 183.3 + 0 + 20 + 0$$

$$T_e = 23.666$$

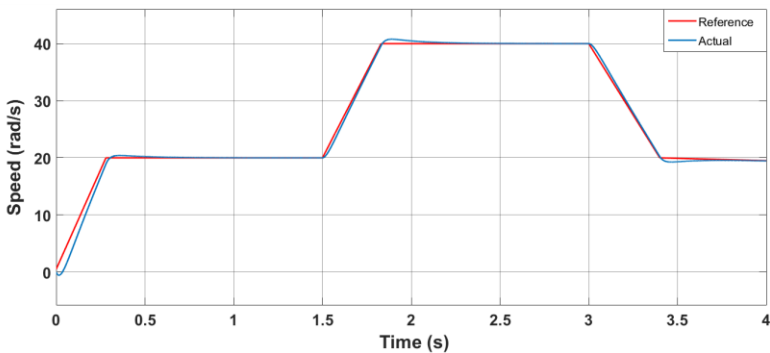
$$T_e = K I_a$$

$$K = \frac{23.666}{23.014}$$

$$K = 1.0283$$

Relay digunakan untuk menghasilkan sinyal PWM pada konverter dengan *hysteresis band* yang digunakan sebesar 1 A.

Berdasarkan nilai parameter yang ada, dilakukan pengujian terhadap motor DC dengan pengaturan kecepatan. Pada gambar 3.5 diketahui bahwa motor mampu mengikuti nilai kecepatan referensi yang diberikan.



Gambar 3. 5 Pengujian pengaturan kecepatan motoc DC

3.3 Sumber Tenaga

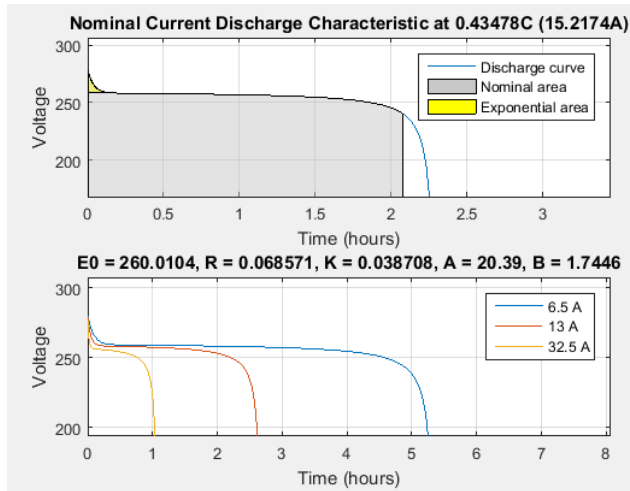
Kendaraan listrik pada tugas akhir ini memiliki dua sumber tenaga, yaitu baterai dan superkapasitor. Kedua jenis sumber tenaga ini memiliki karakteristik yang berbeda. Baterai digunakan sebagai sumber tenaga utama, sedangkan superkapasitor digunakan sebagai sumber tenaga penunjang pada saat beban puncak. Beban puncak terjadi ketika kendaraan listrik mengalami percepatan. Kedua sumber tenaga ini didesain untuk mampu menerima daya *regenerative breaking* ketika kendaraan listrik mengalami pengereman.

3.3.1 Baterai

Baterai merupakan sumber tenaga utama dalam sistem yang dirancang. Baterai dapat bekerja dalam dua mode, yaitu *discharge* dan *charge*. Pada tugas akhir ini, baterai yang digunakan adalah baterai *Li-Ion*. Nilai-nilai parameter pada tabel 3.5 dipilih berdasarkan referensi [10] dengan kapasitas baterai yang disesuaikan dengan durasi simulasi.

Tabel 3. 5 Parameter baterai Li-Ion

Parameter	Nilai
Tegangan nominal	278 Volt
Kapasitas nominal	35 Ah
Arus keluaran nominal	15.2174 Ampere
<i>State Of Charge</i> (SOC) awal	80 %



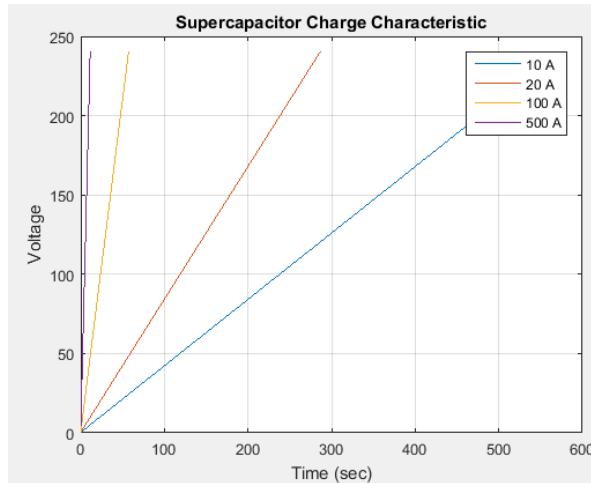
Gambar 3. 6 Kurva karakteristik *discharge* baterai Li-Ion [19]

3.3.2 Superkapasitor

Superkapasitor difungsikan sebagai sumber tenaga pendukung dimana superkapasitor akan bekerja ketika terjadi lonjakan daya baik saat *discharging* maupun *regenerative breaking*. Lonjakan daya tersebut akan dipenuhi atau diterima oleh baterai selama kurun waktu yang lebih lama. Hal ini menyebabkan baterai bekerja lebih ringan karena adanya daya yang dipenuhi oleh superkapasitor. Pada tugas akhir ini digunakan superkapasitor dengan parameter seperti pada table 3.6 yang merujuk pada referensi [10].

Tabel 3. 6 Parameter superkapasitor

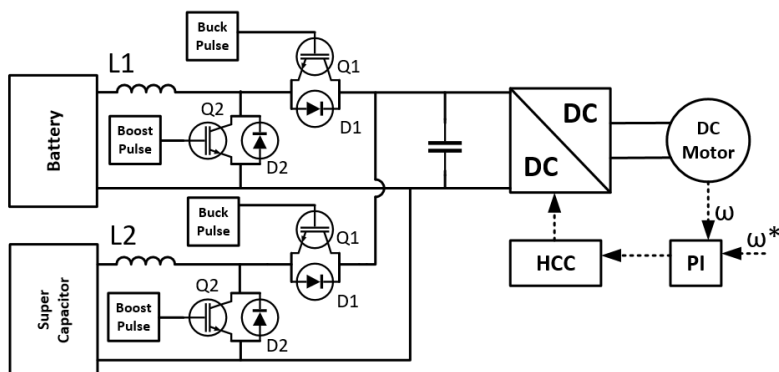
Parameter	Nilai
Kapasitas nominal	23.9 F
Tegangan nominal	240 Volt
Tegangan mula	190 Volt
Hambatan seri ekuivalen	0.0089 Ω



Gambar 3. 7 Kurva karakteristik *charge* superkapasitor [20]

3.4 Manajemen Daya

Dengan digunakannya dua sumber tenaga pada sistem kendaraan listrik, maka diperlukan strategi pengatur aliran daya antara kedua sumber tenaga pada sistem. Pada tugas akhir ini masing-masing sumber tenaga dirancang memiliki konverter DC-DC. Agar mampu menerima daya *regenerative braking* saat terjadi pengereman, konverter yang digunakan pada masing-masing sumber adalah konverter *bidirectional*. Setiap konverter kemudian dihubungkan pada DC Bus seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8. Konverter *bidirectional* pada baterai dan superkapasitor yang dipasang paralel antara dengan DC Bus memberikan fleksibilitas manajemen daya yang baik ketika daya mengalir menuju DC Bus dengan mode *boost* maupun ketika daya mengalir dari DC Bus dengan mode *buck*.



Gambar 3. 8 Skematik sistem kelistrikan kendaraan listrik

Tegangan DC *Bus* dijaga konstan pada nilai 400 V. Nilai ini kemudian akan menjadi referensi dalam strategi pengaturan konverter dan pembagian daya.

3.4.1 Konverter Bidirectional

Konverter bidirectional yang dirancang pada kedua sumber tenaga memiliki mode boost ketika daya mengalir dari baterai menuju ke DC *Bus* dan mode buck ketika daya mengalir dari DC *Bus* menuju ke baterai.

3.4.1.1. Konverter pada baterai

Perhitungan nilai-nilai komponen pada konverter *bidirectional* baterai dilakukan pada mode *boost* terlebih dahulu. Nilai tegangan nominal baterai yang dipakai adalah 278 V dan dinaikkan sesuai nilai tegangan DC *Bus* sebesar 400 V. Tabel 3.7 menunjukkan parameter yang digunakan dalam perhitungan

Tabel 3. 7 Parameter konverter baterai pada mode boost

Parameter	Nilai
Tegangan masukan (V_i)	278 Volt
Tegangan luaran (V_o)	400 Volt
Frekuensi penyaklaran (f)	5 kHz
Riak arus (ΔI)	0.5 Ampere

Berdasarkan persamaan (26), nilai *duty cycle* dapat dihitung sebagai berikut:

$$V_R = V_i \frac{1}{(1 - k)}$$

$$k = 1 - \frac{V_i}{V_o}$$

$$k = 1 - \frac{278}{400}$$

$$k = 0.305$$

Dari perhitungan diperoleh nilai *duty cycle* yang diperlukan sebesar 0.305. Dengan diketahui nilai *duty cycle*, maka nilai induktor dapat dicari dengan perhitungan berdasarkan persamaan (27) sebagai berikut:

$$L = V_i \frac{k}{\Delta I f}$$

$$L = \frac{278 \cdot 0.305}{0.5 \cdot 5000}$$

$$L = 33.9 \text{ mH}$$

Dari perhitungan didapatkan nilai induktor sebesar 33.9 mH.

Perhitungan kedua dilakukan saat konverter baterai pada mode *buck*. Mode ini merupakan mode *charging* baterai karena daya mengalir dari DC Bus menuju ke baterai. Untuk meningkatkan kualitas tegangan luaran konverter dalam mode *buck*, maka perlu dipasang sebuah kapasitor. Dalam perhitungan kapasitor, baterai dimodelkan sebagai beban R_{bat} . Berikut merupakan parameter konverter baterai pada mode *buck*.

Tabel 3. 8 Parameter konverter baterai pada mode *buck*

Parameter	Nilai
Tegangan sumber (V_i)	400 Volt
Tegangan luaran (V_o)	278 Volt
Frekuensi penyaklaran (f)	5 kHz
Riak arus (ΔI)	0.5 Ampere
Riak tegangan (ΔV)	5.6 %

Perhitungan *duty cycle* dan nilai induktor berdasarkan pada persamaan (18) dan (20) dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{V_o}{V_i} \\
 k &= \frac{278}{400} \\
 k &= 0.695 \\
 L &= \frac{V_i(1-k)k}{\Delta If} \\
 L &= \frac{400(1-0.695)0.695}{0.5 \cdot 5000} \\
 L &= 33.9 \text{ mH}
 \end{aligned}$$

Perhitungan menghasilkan nilai induktor sebesar 33.9 mH.

Pada perhitungan nilai kapasitor, beban R_{bat} dimodelkan berdasarkan nilai nominal tegangan dan arus baterai. Perhitungan nilai kapasitor berdasarkan pada persamaan (21) dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 R_{bat} &= \frac{V_{nom}}{I_{nom}} \\
 R_{bat} &= \frac{278}{15.217} \\
 R_{bat} &= 18.269 \Omega \\
 C &= \frac{(V_o + \Delta V)(1-k)}{f \cdot \Delta V \cdot R_{bat}} \\
 C &= \frac{(278 + 15.56)(1-0.695)}{5000 \cdot 15.56 \cdot 18.269} \\
 C &= 70.6 \mu F
 \end{aligned}$$

Perhitungan menghasilkan nilai kapasitor sebesar 70.6 μF .

Karena konverter yang digunakan merupakan jenis *bidirectional*, pada rangkaian ekivalennya hanya digunakan satu induktor. Hasil perhitungan mode *boost* dan *buck* menunjukkan nilai induktor yang sama sehingga digunakan induktor dengan nilai 33.9 mH.

3.4.1.2. Konverter pada superkapasitor

Perhitungan nilai-nilai komponen pada konverter *bidirectional* superkapasitor dilakukan pada mode *boost* terlebih dahulu. Nilai tegangan nominal superkapasitor yang dipakai adalah 240 V dan dinaikkan sesuai nilai tegangan DC *Bus* sebesar 400 V. Tabel 3.9 menunjukkan parameter yang digunakan dalam perhitungan

Tabel 3. 9 Parameter konverter superkapasitor pada mode *boost*

Paratameter	Nilai
Tegangan sumber (V_i)	240 Volt
Tegangan luaran (V_o)	400 Volt
Frekuensi penyaklaran (f)	5 kHz
Riak arus (ΔI)	1.5 Ampere

Berdasarkan persamaan (26), nilai *duty cycle* dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}V_R &= V_i \frac{1}{(1 - k)} \\k &= 1 - \frac{V_i}{V_o} \\k &= 1 - \frac{240}{400} \\k &= 0.4\end{aligned}$$

Dari perhitungan diperoleh nilai *duty cycle* yang diperlukan sebesar 0.4. Dengan diketahui nilai *duty cycle*, maka nilai induktor dapat dicari dengan perhitungan berdasarkan persamaan (27) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}L &= V_i \frac{k}{\Delta I f} \\L &= \frac{240 \cdot 0.4}{1.5 \cdot 5000} \\L &= 12.8 \text{ mH}\end{aligned}$$

Perhitungan menghasilkan nilai induktor sebesar 12.8 mH.

Perhitungan kedua dilakukan saat konverter superkapasitor pada mode *buck*. Mode ini merupakan mode *charging* superkapasitor karena lonjakan daya mengalir dari DC *Bus* menuju ke superkapasitor. Pada

mode ini tidak dipakai kapasitor sebagai perbaikan kualitas tegangan. Berikut merupakan parameter konverter superkapasitor pada mode *buck*.

Tabel 3. 10 Parameter konverter superkapasitor pada mode *buck*

Parameter	Nilai
Tegangan sumber (V_i)	400 Volt
Tegangan luaran (V_o)	240 Volt
Frekuensi penyaklaran (f)	5 kHz
Riak arus (ΔI)	1.5 Ampere

Perhitungan *duty cycle* dan nilai induktor berdasarkan pada persamaan (18) dan (20) dituliskan sebagai berikut:

$$k = \frac{V_o}{V_i}$$

$$k = \frac{240}{400}$$

$$k = 0.6$$

$$L = \frac{V_i(1-k)k}{\Delta I f}$$

$$L = \frac{400(1-0.6)0.6}{1.5 \cdot 5000}$$

$$L = 12.8 \text{ mH}$$

Perhitungan menghasilkan nilai induktor sebesar 12.8 mH.

Pada DC *Bus* terdapat kapasitor yang memiliki peran sangat penting. Kapasitor ini berperan untuk menjaga tegangan DC *Bus* dalam kualitas yang baik. Perhitungan nilai kapasitor tersebut dilakukan melalui analisis rangkaian *boost* pada baterai dengan pertimbangan bahwa baterai merupakan penyimpanan energi utama pada sistem. Dengan menggunakan *duty cycle* 0.305 dan ΔV sebesar 6 V, nilai C dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$C = \frac{(V_o + \Delta V)(1-k)}{f \cdot \Delta V \cdot R_{dc}}$$

Dimana R_{DC} merupakan perbandingan nilai kuadrat tegangan dengan nilai daya pada DC Bus. Daya DC Bus diperoleh melalui

perhitungan daya *input* motor dengan asumsi efisiensi konverter pengatur kecepatan motor sebesar 0.9.

$$P_{DC} = \frac{P_{in}}{\eta}$$

$$P_{DC} = \frac{4603}{0.9}$$

$$P_{DC} = 5114.4 \text{ watt}$$

$$R_{DC} = \frac{V_{DC}^2}{P_{DC}}$$

$$R_{DC} = \frac{400^2}{5114.4}$$

$$R_{DC} = 31.28 \Omega$$

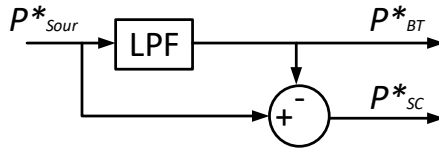
$$C = \frac{(400 + 6)(1 - 0.305)}{5000 \cdot 6 \cdot 31.28}$$

$$C = 522 \mu F$$

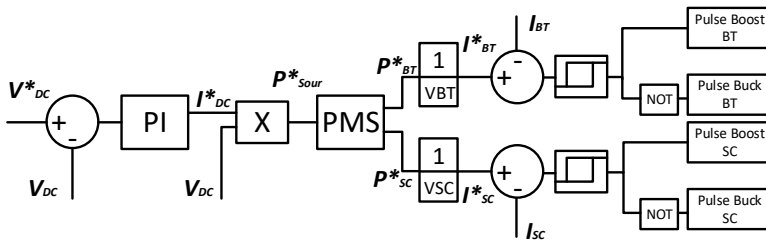
Dari perhitungan diketahui bahwa nilai kapasitor yang digunakan pada DC Bus sebesar 522 μF .

3.4.2 Strategi Pengaturan

Konverter *bidirectional* pada sumber tenaga diatur dengan konfigurasi bertingkat. Dalam upaya menjaga nilai tegangan pada DC Bus, pengaturan nilai tegangan menggunakan *proportional-integral* (PI) *controller* untuk menghasilkan arus referensi total I^*_{DC} . Nilai parameter PI *controller* ditentukan dengan cara *trial and error* dengan K_p dan K_i sebesar 350 dan 1000. Arus referensi total yang telah dihasilkan kemudian diolah oleh *power management system* (PMS) dan didistribusikan sebagai arus referensi pada masing-masing sumber tenaga. Pada skema PMS yang dirancang, daya sumber referensi P^*_{sour} dibagi menggunakan *Low Pass Filter* (LPF). Apabila terjadi variasi daya beban secara tiba-tiba, maka lonjakan daya tersebut akan diterima atau dipenuhi oleh superkapasitor. Hal ini dapat memenuhi kebutuhan daya beban selama periode transien baterai. Prinsip kerja LPF ditunjukkan pada gambar 3.9 dengan frekuensi *cut off* sebesar 1 Hz[10].



Gambar 3. 9 Prinsip kerja LPF pada PMS



Gambar 3. 10 Skema pengaturan konverter *bidirectional* pada sumber tenaga

Sinyal pensaklaran pada konverter baterai dan superkapasitor diatur dengan *hysteresis current control*. Pada tugas akhir ini, *hysteresis band* yang digunakan sebesar 0.2 A.

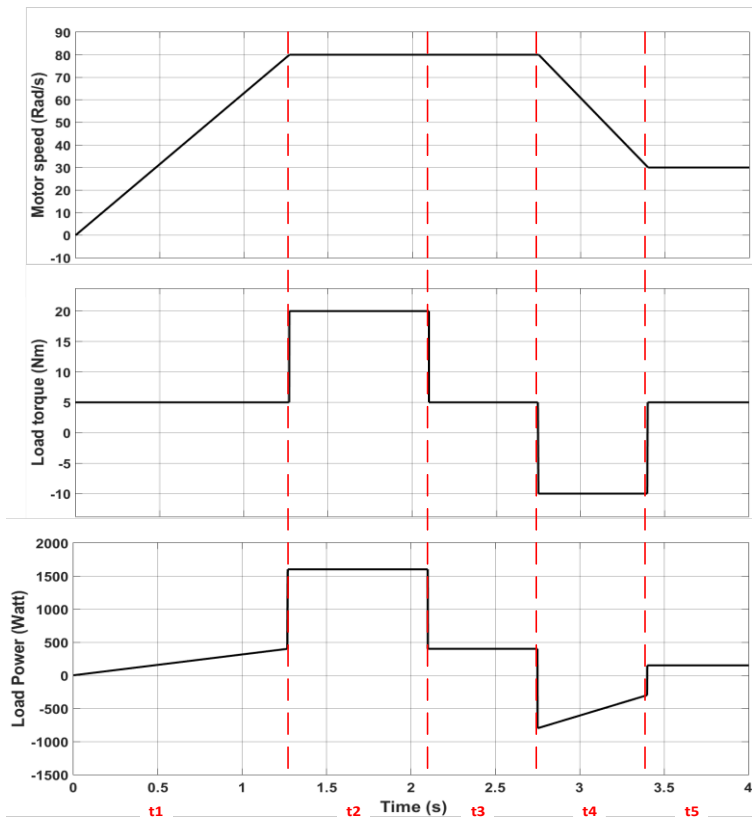
3.5 Hasil Perancangan

Hasil perancangan sistem yang didapatkan dari perancangan komponen-komponen sebelumnya meliputi motor DC, pengatur kecepatan, sumber tenaga, dan sistem manajemen daya dengan konverter *bidirectional*. Hasil perancangan sistem dapat dilihat pada lampiran.

BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian sistem kendaraan listrik akan dilakukan dengan memberikan kecepatan dan beban torsi sesuai dengan nilai yang telah ditentukan. Pengujian akan dilakukan dengan dua macam kondisi yang berbeda. Kondisi pertama adalah kendaraan listrik yang menggunakan dua sumber tenaga berupa baterai dan superkapasitor (sub bab 4.1), sedangkan kondisi kedua adalah kendaraan listrik yang menggunakan satu sumber tenaga berupa baterai (sub bab 4.2).



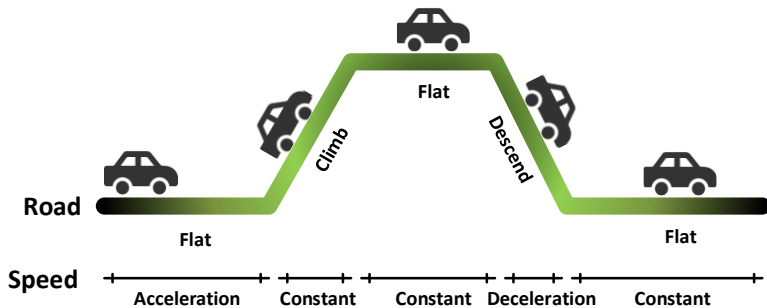
Gambar 4. 1 Pembeban pada motor

Pembebanan pada pengujian kendaraan listrik ini terdiri dari dua macam parameter yaitu kecepatan dan torsi beban seperti yang terlihat pada gambar 4.1

Pada karakteristik pembebanan tersebut terdapat lima mode pembebanan yaitu t1 hingga t5 yang diuji selama 4 detik. Penjelasan secara rinci mengenai karakteristik pembebanan adalah sebagai berikut:

- a. Mode t1 (detik 0 – 1.27)
Pada mode ini kendaraan listrik melakukan start dan mengalami percepatan dengan kecepatan awal 0 rad/s sampai 80 rad/s. Torsi beban bernilai 5 Nm.
- b. Mode t2 (detik 1.27 – 2.1)
Pada mode ini kendaraan listrik memiliki kecepatan yang konstan sebesar 80 rad/s dengan torsi berubah menjadi 20 Nm.
- c. Mode t3 (detik 2.1 - 2.75)
Pada mode ini kendaraan listrik miliki kecepatan tetap sebesar 80 rad/s sedangkan nilai torsi beban berubah menjadi 5 Nm.
- d. Mode t4 (detik 2.75 – 3.4)
Pada mode ini kendaraan listrik melakukan pengereman sehingga kecepatannya berkurang dari 80 rad/s menjadi 30 rad/s sehingga nilai torsi berubah menjadi -10 Nm. Energi kinetik pada saat pengereman akan digunakan untuk *regenerative breaking*.
- e. Mode t5 (detik 3.4 - 4)
Pada mode ini kendaraan listrik memiliki kecepatan 30 rad/s dengan torsi beban yang kembali berubah menjadi 5 Nm.

Berdasarkan pembebanan yang diberikan dan dengan asumsi bahwa daya dorong angin di abaikan, ilustrasi jalan yang dilalui dan kecepatan kendaraan listrik ditunjukkan pada gambar 4.2. Kendaraan listrik yang digunakan dalam ilustrasi berupa mobil.



Gambar 4. 2 Ilustrasi jalan yang dilalui dan kecepatan mobil

4.1 Pengujian dengan Sumber Tenaga Baterai dan Superkapasitor

Pengujian dilakukan ketika kendaraan listrik bekerja dengan sumber tenaga baterai dan superkapasitor. Kendaraan listrik diuji dengan karakteristik pembebanan yang diberikan seperti gambar 4.1. Kemudian akan dilakukan pengamatan terhadap daya pada masing-masing sumber tenaga, DC Bus, dan kecepatan motor. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemasangan superkapasitor pada sistem kelistrikan kendaraan listrik dengan baterai sebagai sumber tenaga utama

4.1.1 Pengamatan Terhadap Daya Sumber Tenaga Baterai dan Superkapasitor.

Pengamatan daya pada masing-masing sumber tenaga dilakukan untuk mengetahui pembagian daya beban kepada masing-masing sumber tenaga berdasarkan karakteristik pembebanan yang diberikan. Hasil dari pengujian ditunjukkan oleh gambar 4.3

Dari hasil pengujian diketahui bahwa kecepatan aktual motor dapat mengikuti kecepatan referensi yang diberikan. Diketahui pula berdasarkan lima mode karakteristik pembebanan yang digunakan, pembagian daya pada masing-masing sumber tenaga adalah sebagai berikut:

- a. Mode t1 (detik 0 - 1.27)

Pada mode ini kendaraan listrik mengalami percepatan. Kenaikan daya motor stabil dan tidak ada lonjakan daya. Oleh karena itu kebutuhan daya dipenuhi oleh baterai sebesar 0-767

watt. Superkapasitor sedikit berperan pada awal motor bekerja karena kebutuhan arus *starting* motor. Daya yang dikeluarkan oleh superkapasitor sebesar 200 watt

b. Mode t2 (detik 1.27 – 2.1)

Pada mode ini kecepatan kendaraan listrik mulai stabil pada nilai 80 rad/s. Namun daya luaran motor meningkat akibat adanya torsi beban yang meningkat secara tiba-tiba. Hal ini menyebabkan superkapasitor merespon dengan cepat lonjakan daya sesaat sebesar 1200 watt sedangkan baterai secara berangsur-angsur memenuhi permintaan daya yang diminta hingga daya 2020 watt.

c. Mode t3 (detik 2.1 – 2.75)

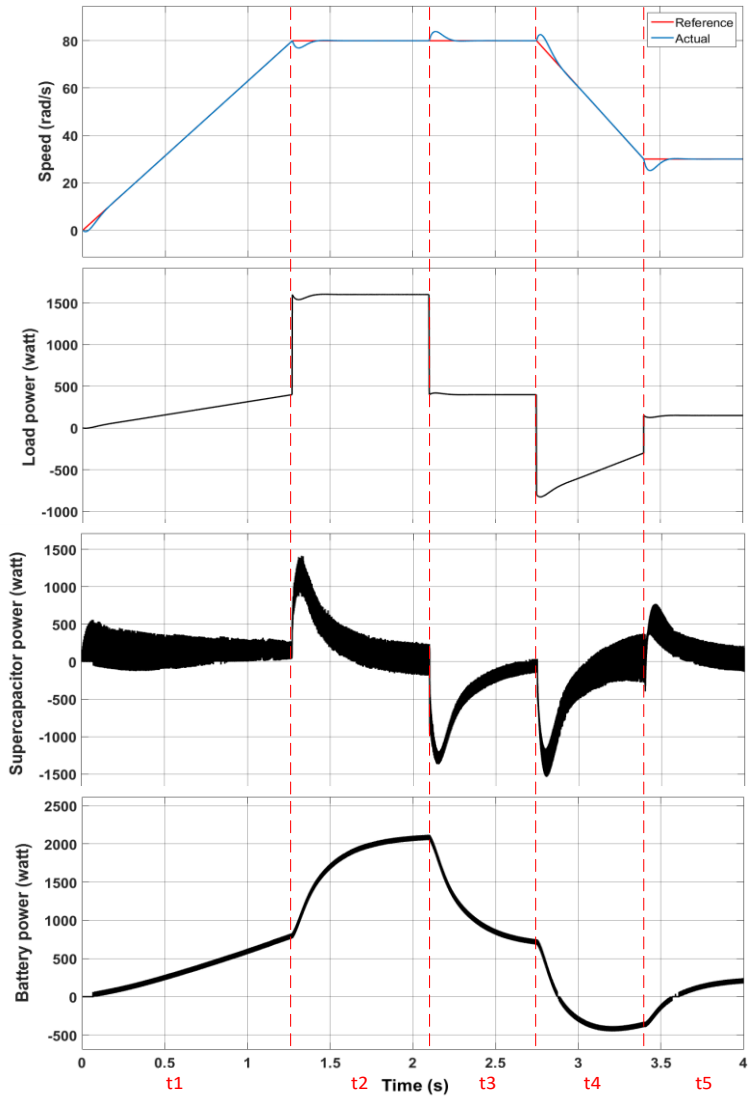
Pada mode ini kecepatan kendaraan listrik masih tetap bernilai 80 rad/s namun torsi beban turun sehingga menyebabkan daya luaran motor turun secara tiba-tiba. Hal ini menyebabkan superkapasitor menerima daya dari baterai agar baterai tidak mengalami agar baterai tidak mengalami perubahan daya secara tiba-tiba. Superkapasitor menerima daya sesaat sebesar 1200 watt dan daya baterai menurun hingga 690 watt.

d. Mode t4 (detik 2.75 – 3.4)

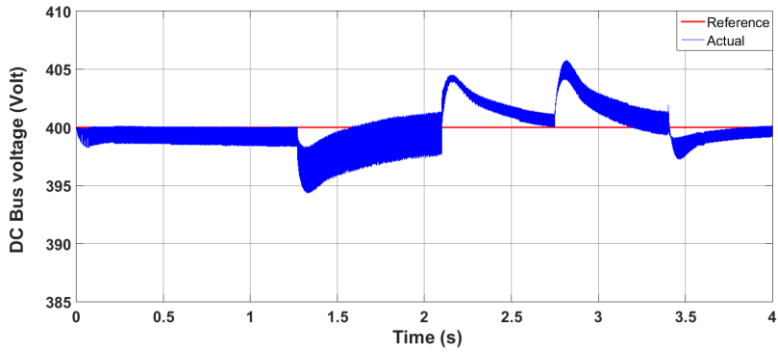
Pada mode ini kendaraan listrik mengalami pengereman yang membuat kecepatannya turun. Torsi beban bernilai negatif sehingga terjadi *regenerativ breaking*. Pada mode ini motor memberikan daya. Superkapasitor merespon cepat lonjakan daya sesaat yang diberikan oleh motor sebesar 1200 watt sedangkan baterai berangsur-angsur menerima daya dengan respon yang lebih lambat hingga 370 watt. Energi yang dihasilkan dari *regenerative breaking* tersebut digunakan untuk *charging* pada baterai dan menambah nilai SOC sebesar 0.0006 %

e. Mode t5 (detik 3.4 – 4)

Pada mode ini torsi beban meningkat kembali yang berarti sumber tenaga harus memenuhi permintaan daya. Perubahan daya luaran motor yang secara tiba-tiba menyebabkan superkapasitor merespon dengan cepat permintaan daya sebesar 500 watt dan baterai secara berangsur-angsur memenuhi kebutuhan daya motor hingga 230 watt.

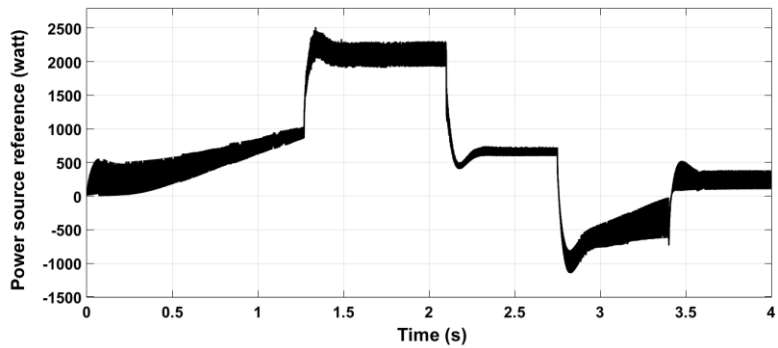


Gambar 4. 3 Hasil pengujian sistem kendaraan listrik dengan superkapasitor

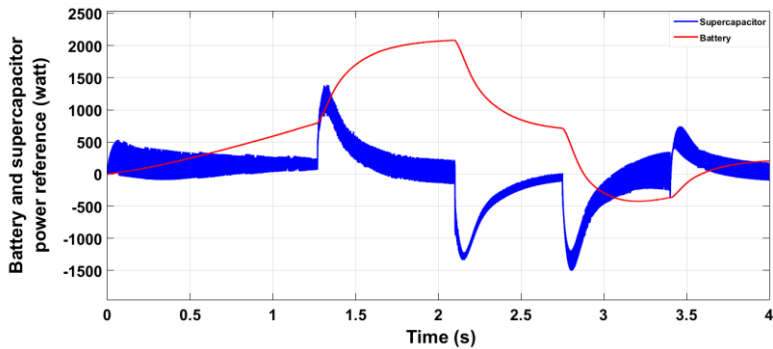


Gambar 4. 4 Tegangan pada DC Bus

Pada gambar 4.4 diketahui melalui pengaturan ini tegangan DC Bus dapat dijaga pada tegangan 400 V. Perubahan nilai tegangan sesaat terjadi ketika adanya perubahan beban. Sedangkan pada gambar 4.6 dapat diketahui pembagian daya referensi baterai dan kapasitor pada PMS. Daya negatif yang muncul menunjukkan bahwa konverter *bidirectional* bekerja saat terjadi *regenerative braking*



Gambar 4. 5 Daya sumber referensi



Gambar 4. 6 Daya referensi pada baterai dan superkapasitor

Pada gambar 4.5 dan 4.6 dapat dilihat bahwa pembagian daya dari daya sumber referensi menjadi daya referensi baterai dan superkapasitor.

4.2 Pengujian dengan Sumber Tenaga Baterai

Pada sub-bab ini dilakukan pengujian kendaraan listrik ketika bekerja dengan sumber tenaga baterai. Pengujian dilakukan menggunakan pembebanan yang sama pada sub-bab sebelumnya yaitu dengan karakteristik pembebanan seperti gambar 4.1. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan sistem kelistrikan kendaraan listrik menggunakan sumber tenaga berupa baterai dengan sistem yang menggunakan sumber tenaga *hybrid*. Kemudian dilakukan pengamatan terhadap daya pada sumber tenaga dan kecepatan motor.

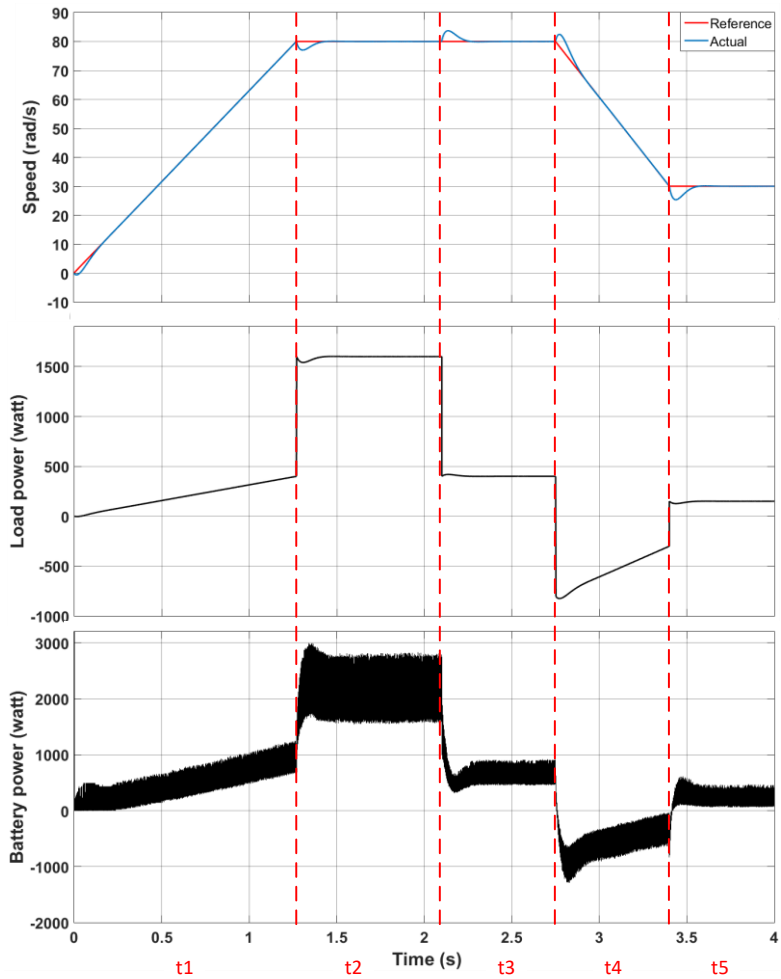
4.2.1 Pengamatan Terhadap Daya Sumber Tenaga Baterai

Pengamatan pada sumber tenaga dilakukan untuk mengetahui respon baterai terhadap karakteristik pembebanan yang diberikan. Hasil pengujian ditunjukkan pada gambar 4.8.

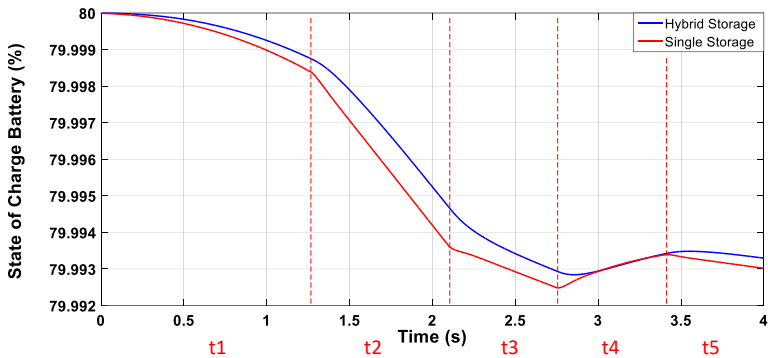
Pada gambar 4.8 diketahui bahwa pada sistem kendaraan listrik dengan sumber energi berupa baterai, kecepatan motor mampu mengikuti kecepatan referensi yang diberikan. Kecepatan motor mengalami perubahan sesaat ketika terjadi perubahan beban motor. Hal ini menunjukkan bahwa konverter pengatur kecepatan motor dapat bekerja dengan baik. Dari hasil pengujian juga dapat diketahui bahwa baterai dapat memenuhi permintaan daya beban yang diberikan. Dengan

digunakannya lima mode pembebanan, daya baterai pada masing-masing mode dipaparkan sebagai berikut:

- a. Mode t1 (detik 0 - 1.27)
Pada mode ini baterai dapat memenuhi kebutuhan daya beban dari 0 hingga 950 watt. Kendaraan listrik mengalami percepatan dengan naikan daya motor stabil dan tidak ada lonjakan daya. Kenaikan tersebut bukan merupakan kenaikan yang ekstrim
- b. Mode t2 (detik 1.27 – 2.1)
Pada mode ini kecepatan kendaraan listrik mulai stabil pada nilai 80 rad/s. Namun daya luaran motor meningkat akibat adanya torsi beban yang meningkat secara tiba-tiba. Hal ini menyebabkan munculnya lonjakan daya pada baterai yang sebelumnya bernilai 950 watt menjadi 2400 watt
- c. Mode t3 (detik 2.1 – 2.75)
Pada mode ini kecepatan kendaraan listrik masih tetap bernilai 80 rad/s namun torsi beban turun sehingga menyebabkan daya luaran motor turun secara tiba-tiba. Perubahan ini menyebabkan daya pada baterai dari 2400 watt menjadi 750 watt
- d. Mode t4 (detik 2.75 – 3.4)
Pada mode ini kendaraan listrik mengalami pengereman yang membuat kecepatannya turun. Torsi beban bernilai negative sehingga terjadi *regenerative breaking*. Pada mode ini motor memberikan daya dan diterima oleh baterai. Daya *regenerative breaking* ini sebesar 900 watt dan menurun hingga 300 watt
- e. Mode t5 (detik 3.4 – 4)
Pada mode ini torsi beban meningkat kembali yang berarti sumber tenaga harus memenuhi permintaan daya. Perubahan daya luaran motor yang secara tiba-tiba menyebabkan perubahan daya pada baterai yang semula menerima daya sebesar 300 watt kini harus memenuhi daya beban sebesar 250 watt.



Gambar 4. 7 Hasil pengujian sistem kendaraan listrik tanpa menggunakan superkapasitor



Gambar 4. 8 *State of Charge* baterai pada konfigurasi *hybrid* dan *single*

Dapat diketahui pada gambar 4.3 dan 4.7 hasil pengujian antara sistem penyimpanan energi kendaraan listrik dengan konfigurasi *hybrid* dan *single*. Pada mode t2 dan t5 dengan konfigurasi *hybrid*, superkapasitor membantu baterai dengan memenuhi kebutuhan daya sesaat sebesar 1200 dan 500 watt diawal lonjakan daya dan baterai memenuhi kebutuhan daya secara berangsur-angsur hingga 2020 dan 230 watt. Sedangkan pada mode yang sama dengan konfigurasi *single*, baterai memenuhi total kebutuhan daya sebesar 2020 dan 230 watt dengan lonjakan daya sesaat sebesar 2500 dan 700 watt. Dengan demikian, superkapasitor dapat membantu baterai untuk memenuhi kebutuhan lonjakan daya beban.

Dapat diketahui pula perbandingan riak daya baterai pada masing-masing konfigurasi. Pada mode t3, riak daya baterai dengan konfigurasi *hybrid* sebesar 76 watt dan dengan konfigurasi *single* sebesar 355 watt. Dengan metode pembagian daya yang digunakan, riak daya pada baterai dapat dikurangi dan terima oleh superkapasitor. Hal ini mengakibatkan kualitas daya baterai pada sistem *hybrid* baterai/superkapasitor lebih baik dibandingkan dengan sistem konfigurasi *single*/baterai saja.

Pada gambar 4.8, diketahui karakteristik SOC baterai pada konfigurasi *hybrid* dan *single*. Berdasarkan karakteristik pembebanan yang diberikan, SOC baterai dengan konfigurasi *single* 5.26 % lebih cepat berkurang dibandingkan dengan konfigurasi *hybrid*. Dengan demikian kombinasi penggunaan baterai dan superkapasitor dapat meningkatkan kehandalan sistem kendaraan listrik dari sisi penyimpanan energi.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi metode pembagian daya baterai/superkapasitor pada kendaraan listrik, didapatkan beberapa kesimpulan, diantaranya:

1. Superkapasitor memiliki kerapatan daya yang besar sehingga dapat memenuhi dan menerima lonjakan daya yang besar.
2. Berdasarkan hasil simulasi, riak daya baterai pada konfigurasi *hybrid* lebih kecil dibandingkan dengan konfigurasi *single* yaitu sebesar 76 watt.
3. Berdasarkan karakteristik pembebanan, SOC baterai pada sistem dengan konfigurasi *single* 5.26 % lebih cepat berkurang dibandingkan konfigurasi *hybrid* dan perubahan SOC terjadi secara signifikan.

5.2 Saran

Dalam upaya pengembangan penelitian ini, penelitian selanjutnya diharapkan mempertimbangkan kondisi SOC pada setiap komponen penyimpanan energi. Analisa kondisi SOC diperlukan agar sistem pembagian daya lebih handal dalam menghadapi berbagai *drive cycle* yang diberikan sekaligus untuk mengantisipasi terjadinya *over charging/discharging*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Karangia, M. Jadeja, C. Upadhyay, and H. Chandwani, "Battery-supercapacitor hybrid energy storage system used in Electric Vehicle," in *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*, Nagercoil, 2013, pp. 688–691.
- [2] Jian Cao and A. Emadi, "A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 122–132, Jan. 2012.
- [3] Paulo G. Pereirinha and João P. Trovão, *Multiple Energy Sources Hybridization: The Future of Electric Vehicles?* INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [4] R. Carter, A. Cruden, and P. J. Hall, "Optimizing for Efficiency or Battery Life in a Battery/Supercapacitor Electric Vehicle," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 4, pp. 1526–1533, May 2012.
- [5] M. Hadartz and M. Julander, "Battery-Supercapacitor Energy Storage," Chalmers University of Technology, Gotenborg, Sweden, 2008.
- [6] F. Akar, Y. Tavlasoglu, and B. Vural, "An Energy Management Strategy for a Concept Battery/Ultracapacitor Electric Vehicle With Improved Battery Life," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 191–200, Mar. 2017.
- [7] M. A, "Lithium-Ion Battery Modelling for Electric Vehicles and Regenerative Breaking Cell Testing Platform," University of Toronto, Electrical and Computer Engineering Department, 2013.
- [8] Y. Matsumura, "Mechanism Leading to Irreversible Capacity Loss in Li Ion Rechargeable Batteries," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 142, no. 9, p. 2914, 1995.
- [9] S. Pay and Y. Baghzouz, "Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles," in *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, Bologna, Italy, 2003, vol. 3, pp. 728–733.
- [10] I. Azizi and H. Radjeai, "A new strategy for battery and supercapacitor energy management for an urban electric vehicle," *Electr. Eng.*, vol. 100, no. 2, pp. 667–676, Jun. 2018.
- [11] I. Azizi and H. Radjeai, "A bidirectional DC-DC converter fed DC motor for electric vehicle application," in *2015 4th International*

- Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Boumerdes, Algeria, 2015, pp. 1–5.
- [12] M. Thowil Afif and I. Ayu Putri Pratiwi, “Analisis Perbandingan Baterai Lithium-Ion, Lithium-Polymer, Lead Acid dan Nickel-Metal Hydride pada Penggunaan Mobil Listrik - Review,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 6, no. 2, pp. 95–99, Aug. 2015.
 - [13] W. Jing, C. Hung Lai, S. H. W. Wong, and M. L. D. Wong, “Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: areview,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 4, pp. 461–469, Mar. 2017.
 - [14] S. J. Chapman, *Electric machinery fundamentals*, 4th ed., internat. ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, 2005.
 - [15] W. Primajati, “Sistem Manajemen Energi Untuk Fuel Cell - Baterai-Superkapasitor (FBS) Pada Mobil Listrik,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2013.
 - [16] M. Ashari, *Desain Konverter Elektronika Daya*. 2017.
 - [17] J. Cao and A. Emadi, “A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles,” *IEEE Trans. POWER Electron.*, vol. 27, pp. 122–132, Jan. 2012.
 - [18] N. Devillers, S. Jemei, M.-C. Péra, D. Bienaimé, and F. Gustin, “Review of characterization methods for supercapacitor modelling,” *J. Power Sources*, vol. 246, pp. 596–608, Jan. 2014.
 - [19] M. 2015a, “Battery.” 2015.
 - [20] M. 2015a, “Supercapacitor.” 2015.

LAMPIRAN

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Deny Andika Prasetya merupakan pemuda kelahiran Nganjuk, 17 Januari 1996 yang sering dipanggil Deny. Penulis tinggal di lereng Gunung Wilis yang berjarak 27 km dari pusat Kabupaten Nganjuk. Penulis memulai pendidikan formal saat pendidiah dasar di SDN Sawahan 1, pendidikan menengah di SMPN 1 Nganjuk dan SMAN 2 Nganjuk, selanjutnya pada tahun 2014 melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif berkegiatan di Himatektro ITS sebagai staff dan wakil ketua 2 dan menjadi asisten laboratorium konversi energi listrik. Selanjutnya penulis dapat dihubungi melalui: denyandikaprasetya@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan